

携帯電話を支える高周波用半導体

High-Frequency Semiconductor Devices for Mobile Phones

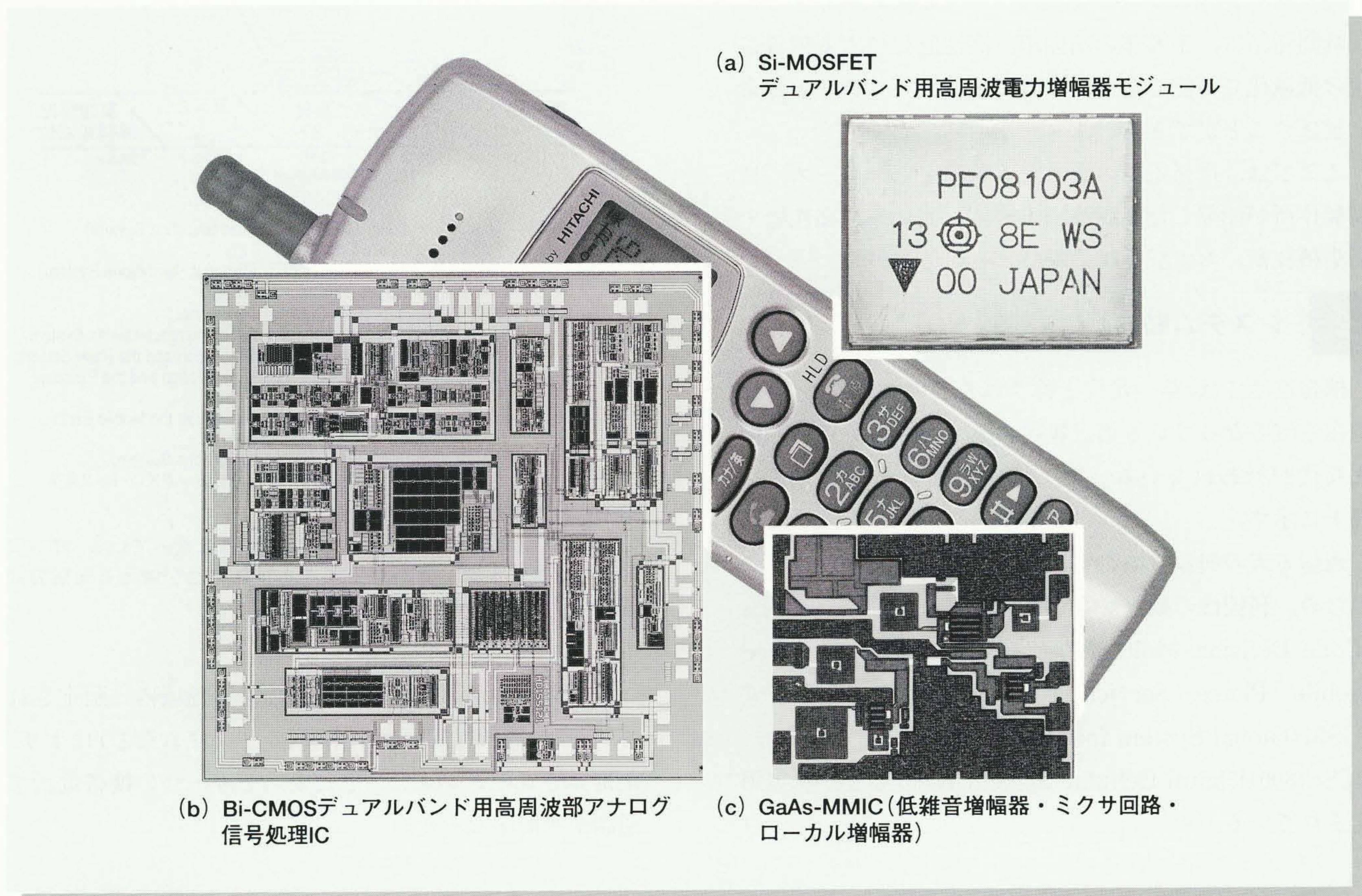
草野忠四郎 Chûshirô Kusano

遠藤武文 Takefumi Endô

坂井修一 Shûichi Sakai

安達徹朗 Tetsuaki Adachi

須藤茂幸 Shigeyuki Sudô



注：略語説明 MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)
Bi-CMOS (Bipolar Complementary Metal-Oxide Semiconductor), MMIC (Microwave Monolithic IC)

携帯電話用の主な高周波用半導体

デュアルバンド用回路をコンパクトにまとめ、各バンドの高効率化を図った小型パッケージ高周波電力増幅器モジュール、受信部(低雑音増幅器・ミキサ回路・ローカル増幅器)の複合化と入出力整合回路を内蔵した小型面実装パッケージGaAs-MMIC、およびデュアルバンドの送受信に必要な高周波アナログ部の大半の機能を内蔵し、小型パッケージ化を実現した高周波部アナログ信号処理ICを開発し、製品化した。

携帯電話の普及が、世界規模で急速に進行している。それは、より小型・軽量化され、技術革新によって半導体部品を中心に低価格化が実現されたことによる。

小型・軽量化、低価格化と長時間通話の確保は変わることのない命題であり、今も着々と技術改革が進められている。

現在、携帯電話の高機能化の進展により、半導体を含む構成部品が増加し、それによる消費電流が増大する方向にある。また、利便性を向上させるために、デュアルバンド方式とデュアルモード方式が実用化されてきてお

り、実装スペースがますます小さくなってきている。このため、使用される半導体には、いっそうの小型・薄型化と低消費電流化が要求されている。

日立製作所は、これらのニーズにこたえるため、携帯電話用の高周波用半導体として、高効率・低消費電流の電力増幅器、高集積・小型化が可能なGaAs-MMIC (Microwave Monolithic IC)、デュアルバンド用Bi-CMOS (Bipolar Complementary Metal-Oxide Semiconductor) アナログ信号処理ICを開発し、製品化した。

1 はじめに

いつでも、どこでも、だれとでもコミュニケーションを可能にする携帯電話では、小型・軽量、長時間通話が要求される。小型・軽量化では、半導体の高集積化と小型パッケージ化によって実装スペースの低減ができる。長時間通話は、半導体の高効率、高性能化による消費電流の低減化で可能となり、これによってバッテリーの寿命を延ばすことができる。

ここでは、携帯電話のシステム動向とそのニーズ、日立製作所が開発した高周波用半導体の高効率、高性能・高集積技術、および今後の展望について述べる。

2 システム動向とニーズ

携帯電話では、第一世代と称されるアナログ方式から、現在主流となっている第二世代のデジタル方式へと世代交代が行われている。第二世代の主要な通信方式を表1に示す。

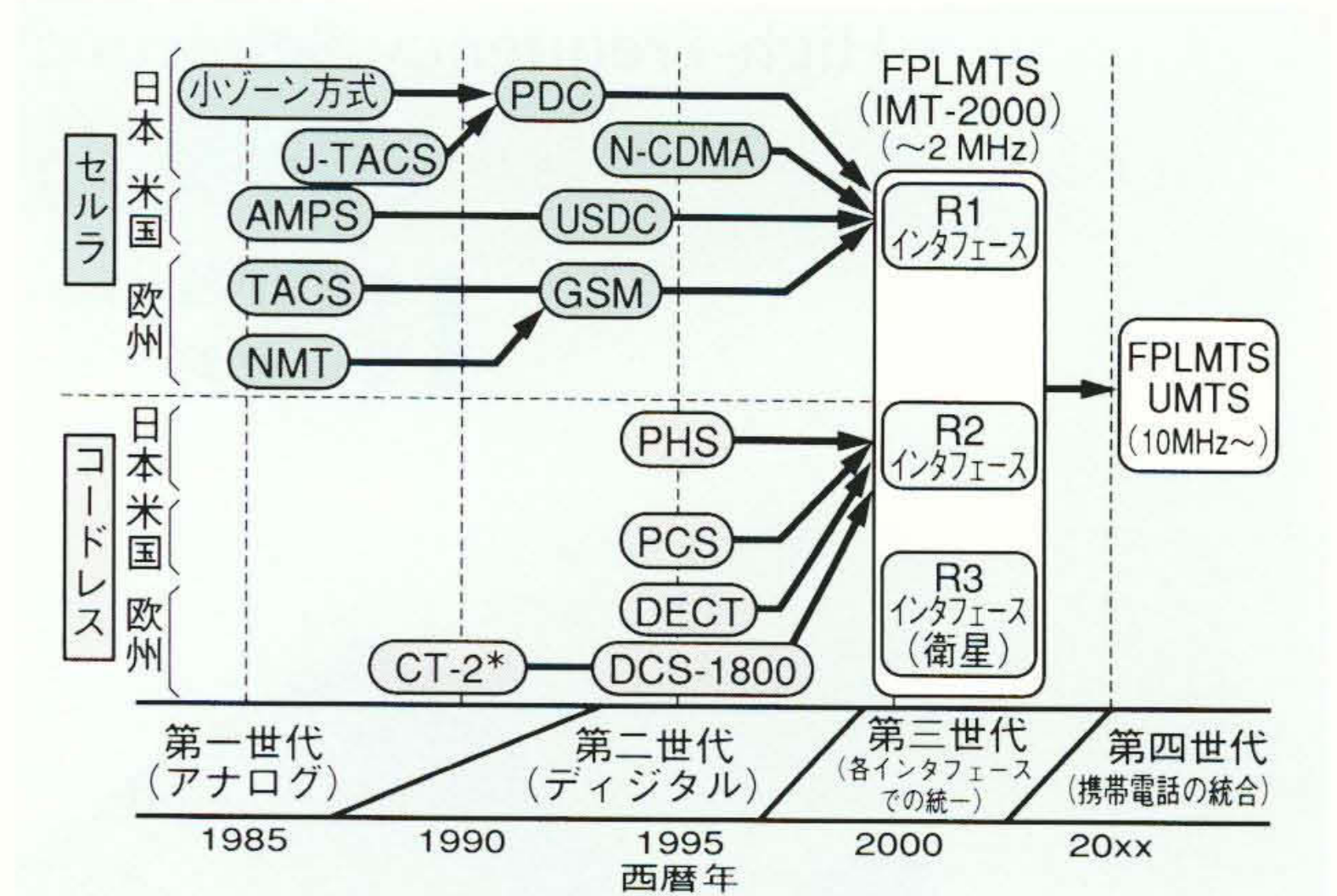
通信方式の異なる携帯電話間では通話ができない。このため、利便性の観点からデュアルモード方式〔CDMA (Code Division Multiple Access), AMPS(Advanced Mobile Phone Service)など〕とデュアルバンド方式〔GSM(Global System for Mobile Communications), DCS-1800(Digital Cellular System 1800)など〕が実用化されている。

表1 デジタル携帯電話の主な通信方式

PDCはわが国で、GSMは欧州を中心に合計で世界100か国以上で、N-CDMAはアジア、米国、わが国でそれぞれ採用されている。W-CDMAは、IMT-2000の候補としてわが国から提案されている。

項目	通信方式	PDC	GSM	N-CDMA (IS-95)	W-CDMA (IMT-2000)
周波数帯		800 MHz/1.5 GHz	900 MHz	800 MHz	2GHz
チャンネル間隔		25 kHz (交互配置)	200 kHz	1.25 MHz	5MHz
送信電力		0.8~3 W	0.8~8 W	0.2 W~6.3 W	0.3~4.8 W
キャリア間周波数		130 MHz(800 MHz) 48 MHz(1.5 GHz)	45 MHz	45 MHz	190 MHz
ユーザー データ レート		9.6~28.8 kビット/s	14.4 kビット/s	9.6~64 kビット/s	16 k~2 Mビット/s
信号伝送速度		42 kビット/s	270.833 kビット/s	1.2288 Mチップ/s spreading	(例：4.069 M チップ/s)*1 spreading
アクセス方式		TDMA/FDD	TDMA/FDD	CDMA/FDD	CDMA/FDD, TDD
1キャリア当たりの 音声チャンネル数		3(6)	8(16)	55	(256)*2
変調方式		四相シフトQPSK	GMSK	OQPSK/QPSK	QPSK
音声符号化方式		VSELP/11.2 kビット/s (PSI-CELP/5.6 kビット/s)	RPE-LTP/ 13 kビット/s	EVRC / 8 kビット/s ほか / 13 kビット/s	(例：CSA-CELP)

注：略語説明ほか
PDC(Personal Digital Cellular Telecommunication System)
N-CDMA(Narrowband Code Division Multiple Access)
IS-95(Interim Standard 95)
W-CDMA(Wideband CDMA)
IMT-2000(International Mobile Telecommunication 2000)
TDMA(Time Division Multiple Access)
FDD(Frequency Division Duplex)
TDD(Time Division Duplex)
QPSK(Quadrature-Shift Keying)
GMSK(Gaussian Filtered Minimum Shift Keying)
OQPSK(Offset QPSK)
VSELP(Vector-Sum Excited Linear Predictive Coding)
PSI-CELP(Code Excited Linear Prediction)
RPE-LTP(Regular Pulse Excitation with Long-Term Prediction)
EVRC(Enhanced Variable bit Rate Coder)
CSA-CELP(Coordinate Structure Algebraic Code Excited Linear Prediction)
*1 1.024 M/4.096 M/8.192 M/16.384 Mがあり、4.096 M時のユーザー データ レート 最大 384 kビット/s
*2 4.096 M spreading @ 16 kビット/s チャネル



注：略語説明ほか J-TACS (Japanese Total Access Communication System)
NMT (Nordic Mobile Telephone)
USDC (US Digital Cellular), PHS (Personal Handyphone System)
PCS (Personal Communication Services)
DECT (Digital European Cordless Telephone)
FPLMTS (Future Public Land Mobile Telecommunications System)
R1 (Radio Interface between a Mobile Station and the Base Station)
R2 (Radio Interface between a Personal Station and the Personal Base Station)
R3 (Radio Interface between the Satellite and the Mobile Earth Station)
UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)
* 米国で開発された発信専用タイプのデジタル方式コードレス電話

図1 携帯電話の動向と予測

現在は、第二世代のデジタル方式が主流となっている。ITU(国際電気通信連合)が、地球のどこでも携帯電話が使える通信方式“IMT-2000”の導入を進めている。

携帯電話の通話範囲は、地上のある地域内に限定されていたが、低軌道周回通信衛星(イリジウムなど)により、全世界でシームレスに、どこからでも一つの携帯電話で通話が可能となった。

地上系携帯電話サービスも受けられるデュアルモード携帯電話を用いれば、地上系電波が届かないエリアに出た場合には衛星サービスを利用するといった使い分けができる。地球との距離が短い低軌道周回通信衛星を使うために、電波の伝搬遅延時間が短く、相手の声の遅れがほとんど気にならないという特色もある。

次世代携帯電話としての第三世代では、マルチメディアに対応し、ITU(国際電気通信連合)が、世界的規模でのローミング(移動接続)を可能にするデジタル通信方式“IMT-2000”の2001年からの導入を目指している。従来システムとの協調性を保つため、デュアルモード方式による複合機が考えられているが、さらにトリプルモード方式を採用する可能性もある。各世代の動向を図1に示す。

このような動向の中で、高周波用半導体としては、(1)デュアルバンド方式への対応などによる携帯電話内部のいっそうの小型化、(2)省スペース化を実現するための高集積化、(3)バッテリーの長寿命化のための高効率化、(4)高品質通信のための変調特性の高精度化、(5)低ひずみ増幅のための高リニアリティ特性などが要求される。これらに対応するために日立製作所が開発した製品と技術について、以下に述べる。

3 高効率、高性能化への対応

3.1 Si-MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)デュアルバンド(GSM/DCS-1800)用高周波電力増幅器

デュアルバンド端末のねらいはユーザーの利便性の向

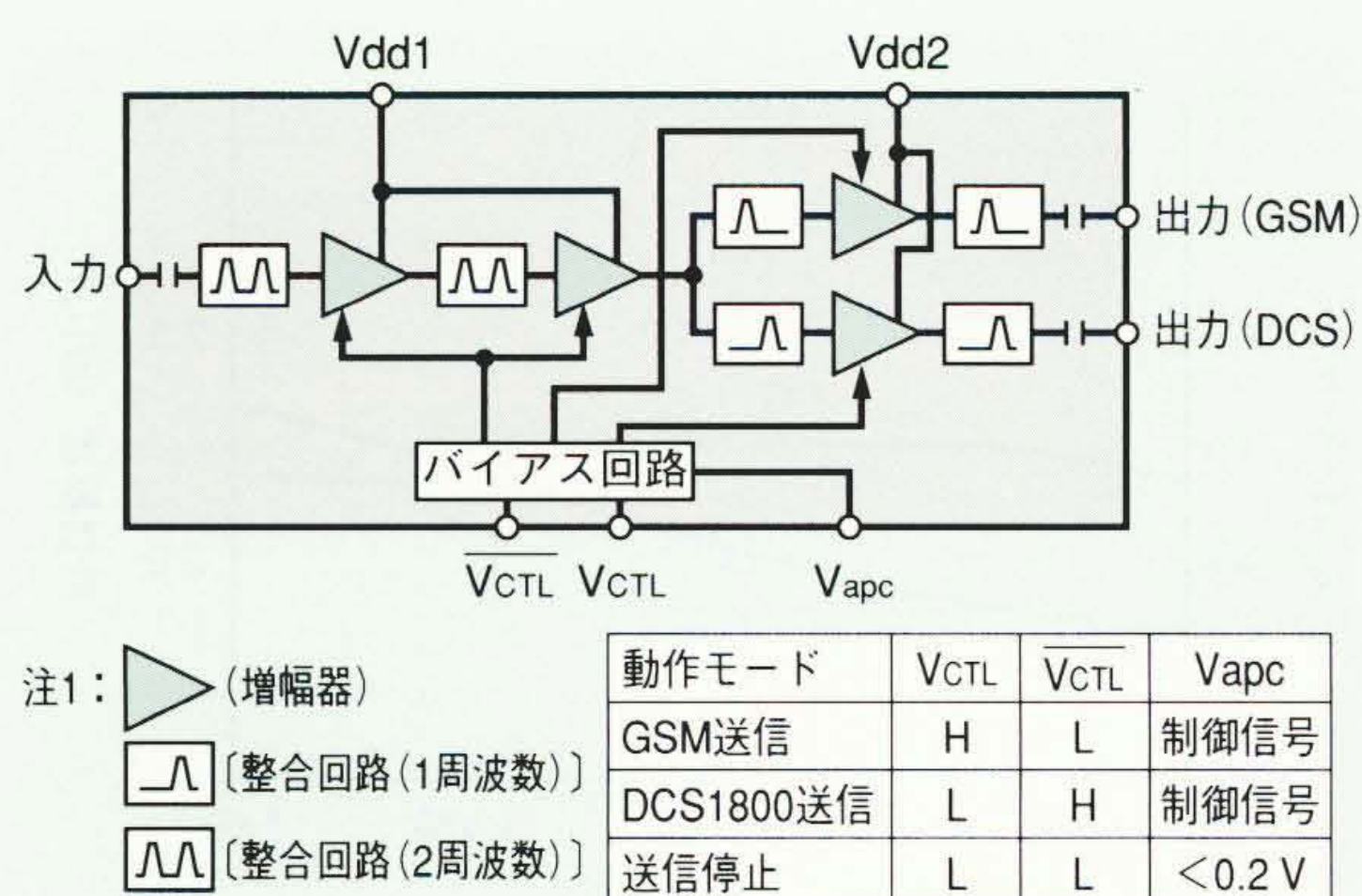


図2 デュアルバンドRFモジュールのブロックダイアグラム
1 入力, 2 出力と内部回路をコンパクトにまとめ、各バンドの高効率化を図った。制御信号1, バンド切換デジタル信号2として制御性を高めている。

上である。多くのユーザーに受け入れられるためには、サイズや価格などをシングルバンド端末にできるかぎり近づける必要がある。したがって、高周波部品に対する要求は、小型化と低価格化である。

送信部の構成としては、2バンドに対応した2個のシングルバンド用電力増幅器を用いる方法が簡単であるが、これは、サイズと価格の点でベストな解ではない。また、1個の増幅器を2バンドの増幅に利用する場合は、電力増幅器だけのサイズは小さくできるが、GSMの2倍の高調波がDCS-1800バンドに近いことから、高調波の処理のための特殊な部品が必要となり、全体としては高価格となる。

日立製作所は、初段と2段の増幅部を2バンド共通化し、各バンドでの動作効率を最適化するために2個の最終段を採用した、小型で低価格のデュアルバンド用高周波電力増幅器モジュール(以下、「RFモジュール」と言う)“PF08103A”を開発した。

開発した3段のデュアルバンドRFモジュールのブロックダイアグラムを図2に示す。入力や、初段と2段目の段間整合回路は2周波数に整合させ、最終段の入出力は、各周波数に整合させた。動作モードの選択は外部からのバンド切換ロジック信号による。

増幅用デバイスには、微細化プロセスによる高性能MOSFETを採用した。MOSFETは制御が容易で、かつ熱的安定性に優れ、シリコンプロセスをベースとしているために大量生産に向いているなどの特徴がある。

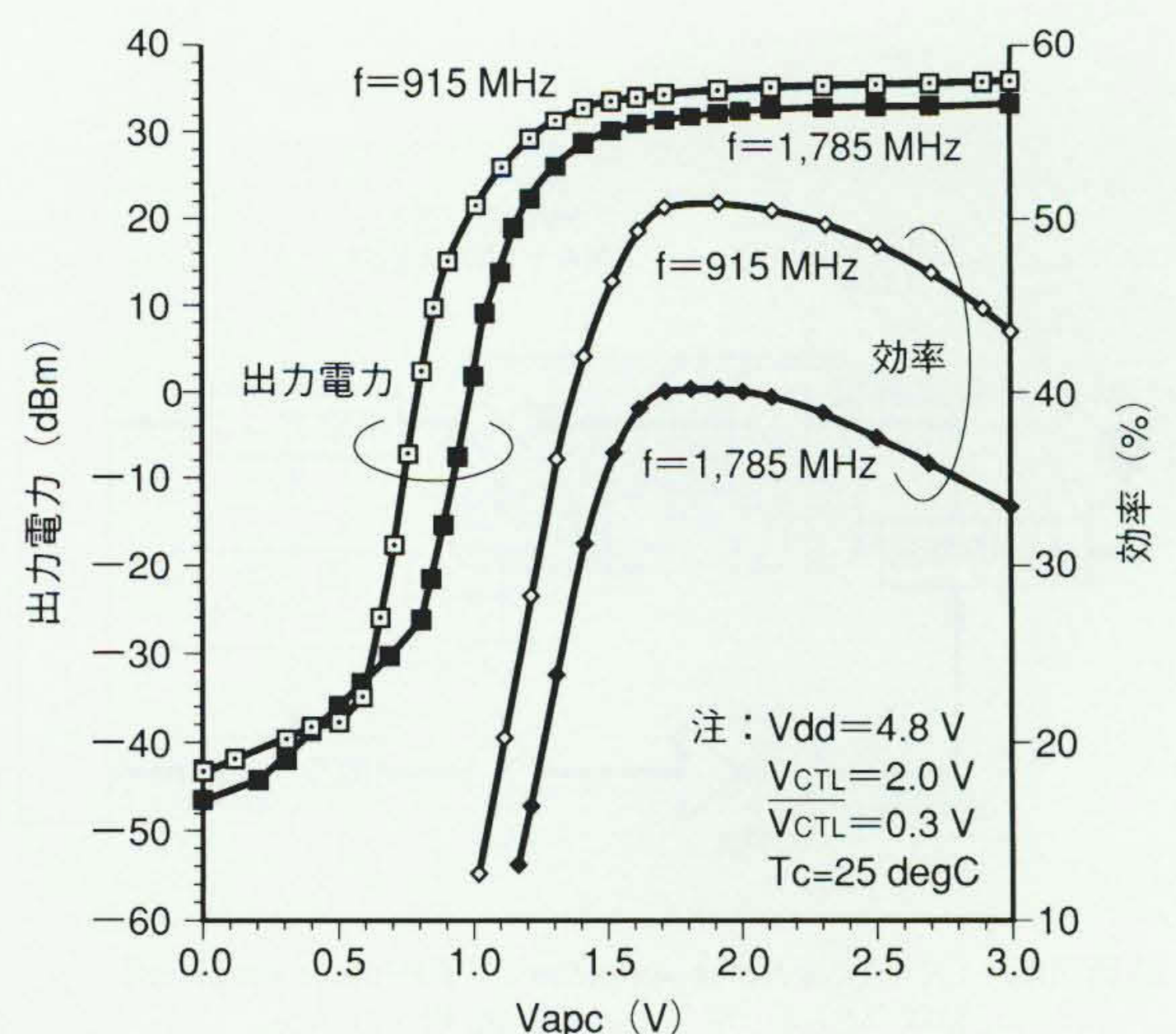


図3 デュアルバンドRFモジュールの出力と効率特性
各バンドの高周波端での効率はGSMで50%を、DCS-1800で40%をそれぞれ実現している。

表2 RFモジュール“PF08103A”の主要特性

GSMはE-GSM帯をカバーし、各バンドとも高効率を得ている。

項 目	特 性	条 件
出力電力	E-GSM : 35.7 dBm(標準)	Vdd=4.8 V
	DCS-1800 : 33.0 dBm(標準)	Vapc=3.0 V Pin=4.5 dBm
効 率	E-GSM : 48%(標準)	Po=34.5 dBm
	DCS-1800 : 40%(標準)	Po=31.5 dBm
パッケージ	面実装タイプ, 11×13.75×1.8(mm)	

3.2 デュアルバンド用RFモジュールの特性

この増幅器はE-GSM(Extended GSM)とDCS-1800の2バンドに対応している。高周波数端での出力電力と効率の制御電圧依存性を図3に、主要特性を表2にそれぞれ示す。GSM帯では50%, DCS-1800帯では40%の値を得ている。また、受信帯での雑音特性では、E-GSMの場合で($f=925$ MHz)−138 dBm/Hzを、GSMの場合で($f=935$ MHz)−139 dBm/Hzをそれぞれ得ている。さらに、GSM動作時の二次高調波のDCS-1800ポートへの漏れは−20 dBm以下に抑えており、外部のフィルタの特性を軽減している。パッケージはリードレスで、かつ多層セラミックを用いて小型化を実現している。

4 高集積化への対応

4.1 GaAs-MMIC(Microwave Monolithic IC)

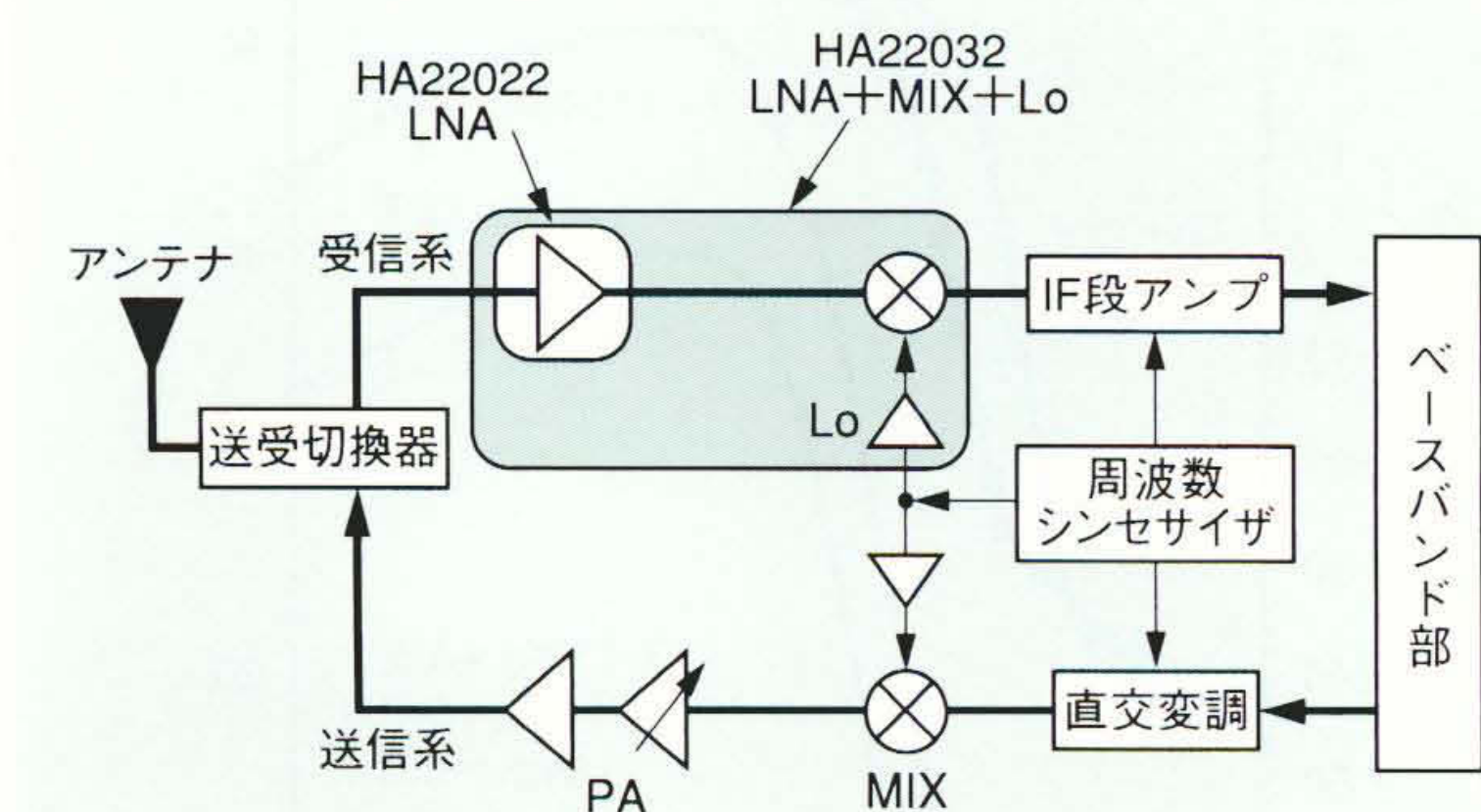
携帯電話需要の急速な増加に対応するために、高い周波数の利用が進められており、高利得、低雑音など高周波特性に優れたGaAs(ガリウムヒ素)化合物半導体デバイスの重要性はますます増大している。GaAsデバイス

の特徴は、優れた能動素子特性に加えて結晶基板が半絶縁性であるため、高周波回路で不可欠な低損失の入出力インピーダンス整合回路を容易に形成できる点にある。このため、GaAs-MMICを用いると周辺部品を大幅にオンチップ化でき、無線部の小型化、組立・調整が不要という、シリコンLSIでは不可能な大きな特徴を得ることができる。

日立製作所はこれまで、低雑音、低ひずみGaAs-FET、厚膜Auめっきによるスパイラルインダクタ技術を開発し、1.9 GHz帯用GaAs-MMICチップセットを製品化している^{1),2)}。その後、携帯電話の急速な小型化へ対応するため、小型プラスチックパッケージによる超小型低雑音増幅器MMIC“HA22022”の製品化とその量産化に成功した³⁾。今回は、いっそうの小型化を図るため、低雑音増幅器、受信ミキサ、およびローカル増幅器など受信部の複合化、入出力整合回路の内蔵化、さらに小型面実装パッケージ〔TSSOP(Thin Small Outline Package) 8ピン, 6.4×3 (mm)]という特徴を持つ複合機能受信部用MMIC“HA22032”を開発し、量産化した(図4参照)。

HA22032の高周波特性を図5に示す。ゲート長は0.4 μ mで、デュアルゲートGaAs-MESFET(Metal-Semiconductor FET)を用いることにより、1.5 GHz動作で変換利得26 dB、雑音指数2 dBの高利得、低雑音特性を得ている。さらに、同一条件下で三次出力インタセプトポイント4 dBmと良好なひずみ特性を得ている。また、このMMICを用いることにより、周辺部品も含めて約 $\frac{1}{2}$ の小型化(日立製作所従来製品比)を可能にした。

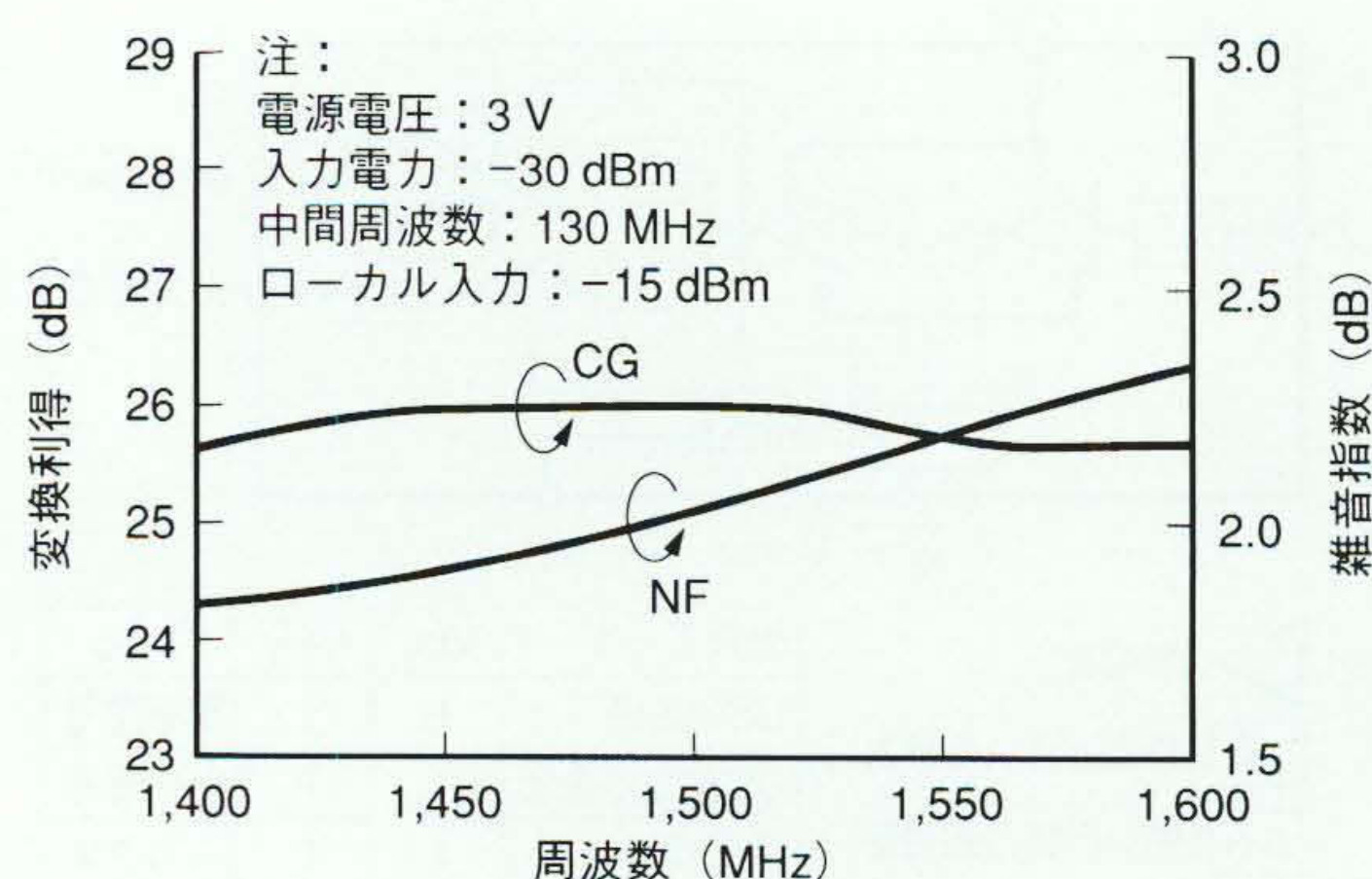
今後は、携帯電話システムの多重化と携帯電話のいっそうの小型化の要求にこたえるため、受信部だけにとど



注：略語説明 LNA (Low Noise Amplifier), PA (Power Amplifier)
MIX (Mixer), IF (Intermediate Frequency)
Lo (Local Amplifier)

図4 携帯電話無線部のブロック図

実装面積のいっそうの小型化を目指して、整合回路内蔵の複合化(LNA + MIX + Lo)MMIC“HA22032”を開発した。



注：略語説明 CG (Conversion Gain), NF (Noise Factor)

図5 HA22032の高周波特性

周波数1.5 GHzで変換利得26 dB、雑音指数2 dBの高周波特性を得た。

まらず、送信部も含めた高集積・複合機能MMICの開発を進める考えである。

4.2 Bi-CMOSアナログ信号処理IC

市街地でのチャネル不足解消のためにデュアルバンド機への要求が高まり、高周波信号処理部のいっそうの高集積化が強く望まれている。日立製作所は、シングルバンド用ICとして、すでに“HD155101BF”(GSM用)⁴⁾と“HD155111F”(DCS-1800用)を開発し、製品化している。これらを用いることによってデュアルバンド機に対応することは可能ではあるが、実装面積と消費電流が大きくなってしまう。そこで、送受信部をワンチップに集積したGSM/DCS-1800デュアルバンド用高周波部アナログ信号処理IC“HD155121F”を英国のTTP Communications Ltd.社と共同で開発し、製品化した。

4.2.1 HD155121Fの構成

このICには、実績のあるシングルバンドICと同じ0.6 μm Bi-CMOS(Bipolar Complementary Metal-Oxide Semiconductor)プロセスを用い、デュアルバンドの送受信に必要な高周波アナログ部の大半の機能を内蔵した(図6参照)。受信時58.6 mA, 送信時37 mAで動作する。また、パッケージをシングルバンド用ICと同じLQFP(Low Profile Quad Flat Package)〔48ピン, 9.0×9.0(mm)〕とし、実装面積の低減を実現した。

4.2.2 受信系

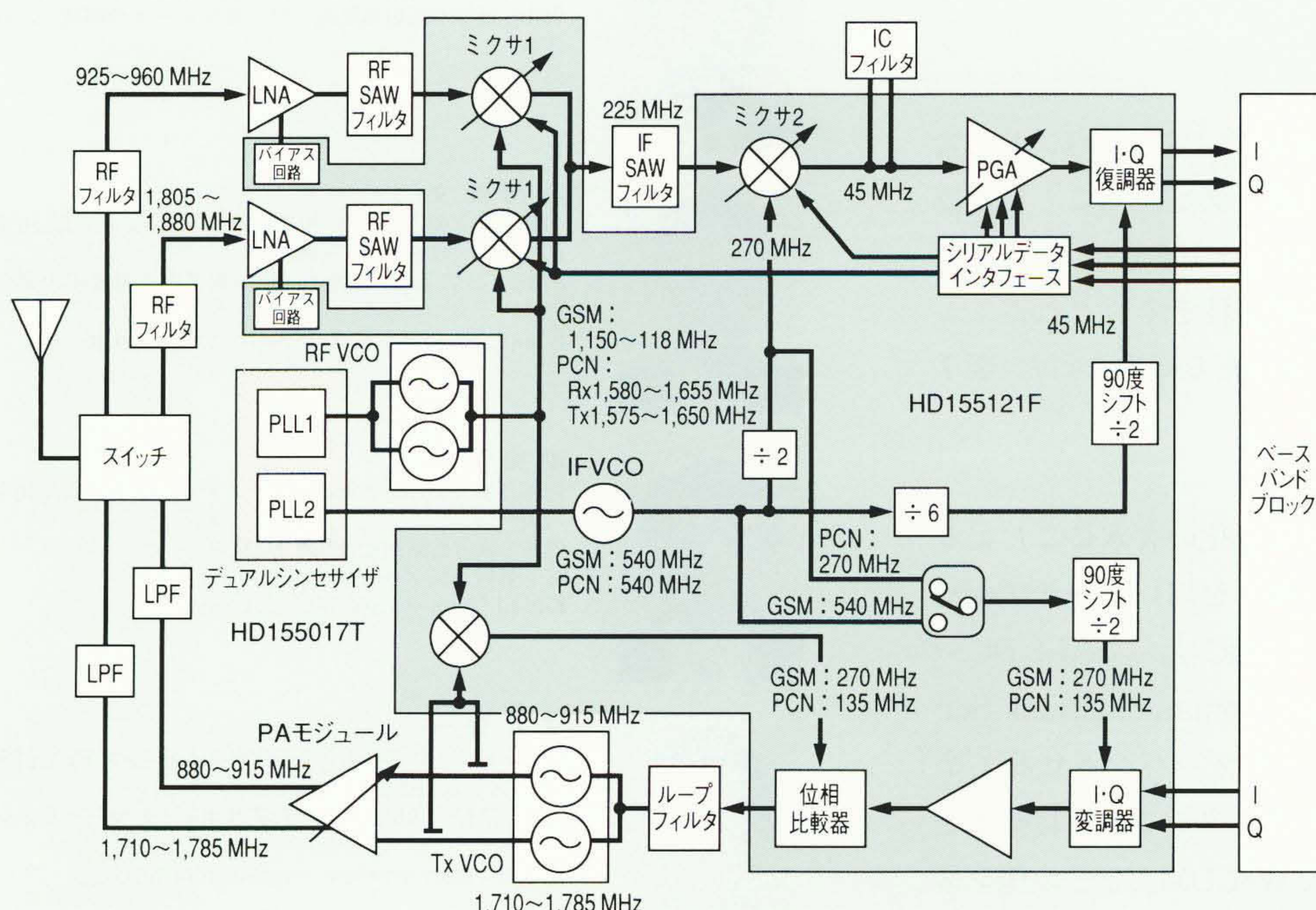
二つの周波数帯域に対して第一ミキサの周波数帯域に合わせて2系統用意し、共通の中間周波数225 MHzに変換するように構成した。これによって第二ミキサ以降はシングルバンドICと共通の構成となる。各周波数帯域での動作はシングルバンド用ICと同じ構成となるため、ユーザーはシングルバンドICと同様のレベルダイヤグラム設計を適用できる。

そのほかの特徴は以下のとおりである。

- (1) LNA用負帰還バイアス回路を内蔵し、LNAに必要な外付け部品を大幅に低減
- (2) 第一、第二ミキサの2段階ゲイン切換機能
- (3) 2 dBステップで50段階のデジタルデータ制御可変ゲイン増幅器
- (4) I・Q(I信号, Q信号)復調器に妨害波抑圧用LPFを内蔵し、実装面積を低減

4.2.3 送信系

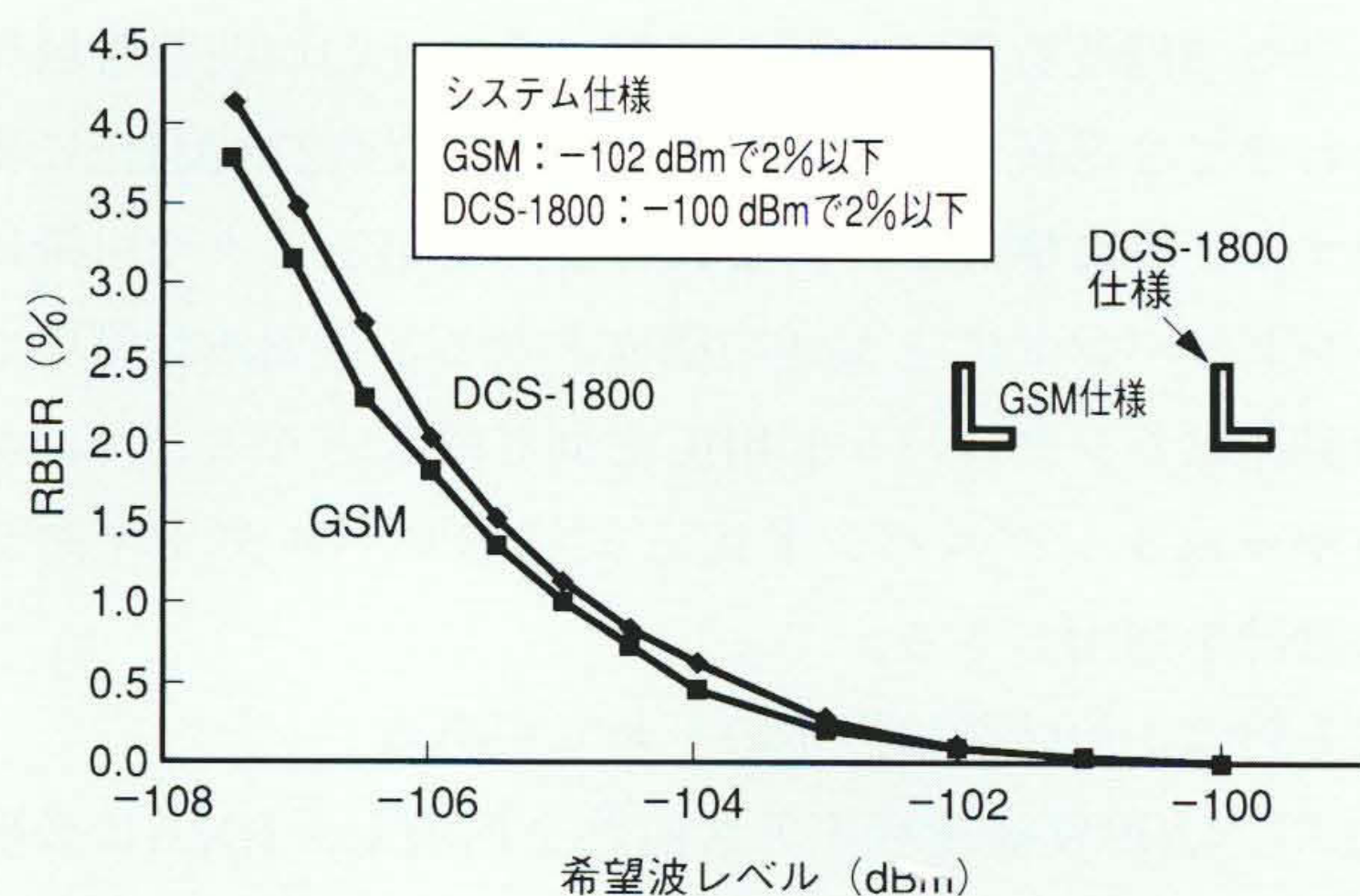
送信出力の雑音特性や位相精度を決定するオフセットPLL回路のループ帯域は、位相比較器の出力電流(A/rad)とループフィルタの伝達関数(V/A)、および送信用VCOの感度(Hz/V)との積に依存する。また、GSMとDCS-1800は、周波数帯域と同様に周波数帯域幅も異なるため、VCOの制御電圧に対する周波数変化量を示す感度も同様に異なる。このICでは、デュアルバンドに対し



注：略語説明
RF (Radio Frequency)
LPF (Low-Pass Filter)
PLL (Phase-Locked Loop)
SAW (Surface Acoustic Wave)
PCN (Personal Computer Network)
Tx (Transmitter)
Rx (Receiver)
VCO (Voltage-Controlled Oscillator)
IC (Inductor, Capacitor)
PGA (Power Gain Control Amplifier)
I (I信号)
Q (Q信号)

図6 HD155121Fのブロック図

デュアルバンド携帯電話の高周波アナログ部の大部分を集積した。すでに開発済みのシングルバンド用ICと同じLQFP48ピンパッケージとしたことにより、実装面積を大幅に低減した。



注：略語説明 RBER (Residual Bit Error Rate)

図7 受信信号レベルに対するRBER特性

GSM, DCS-1800それぞれの受信感度仕様をクリアしている。

て共通の位相比較器で対応するため、オフセットPLLのループ帯域を一定にするには、伝達関数が異なるループフィルタを個別に用意する必要がある。これを回避するため、ループ帯域が一定になるように、バンド選択と、位相比較器の出力電流値を同時に切り替える構成とした。これによってフィルタを共用しながらループフィルタ帯域を一定にでき、外付け部品の低減を実現した。

そのほかの特徴は以下のとおりである。

- (1) 周波数変換にオフセットPLL方式を採用し、送信信号の帯域外雑音を大幅に低減
- (2) デュプレクサを不要にしたことにより、実装基板の小型化、低コスト化を実現

4.2.4 評価結果

IC内個別ブロックの評価に加えて、ベースバンドを含めたシステム評価を実施し、仕様を満足することを確認した。一例をあげると、GSM帯域で-106.3 dBm, DCS-1800帯域で-106 dBmの受信感度特性をそれぞれ得ており、仕様に対して十分にマージンのある特性を得た(図7参照)。

4.2.5 製品展開

いっそうの高集積化と低消費電力化の要求にこたえるために、0.35 μm Bi-CMOSプロセスを用いたトリプルバンドICを現在開発中である。このICは、GSMとDCS-1800に加え、PCS1900(Personal Communications Services 1900)システムも扱えるトリプルバンド仕様であり、LNAとPLLシンセサイザも内蔵することを目指している。今後はこの技術を基に、W-CDMAなどの他システムへ展開を図っていく考えである。

5 おわりに

ここでは、携帯電話のシステム動向、ニーズおよび高周波用半導体への日立製作所の取組みについて述べた。

高周波用半導体は、携帯電話の小型、軽量、長時間通話の実現化に大きく関係しており、いっそうの高効率化、高性能化、高集積化が強く要求されている。

今後、各種の通信方式に対応した高周波半導体の開発と展開を積極的に進めていく考えである。

参考文献

- 1) 草野, 外: 低消費電力・低雑音のマイクロ波集積回路(ガリウムひ素MMIC), 日立評論, **75**, 4, 269~274(平5-4)
- 2) 秋武, 外: デジタル携帯型通信端末用低電圧デバイス, 日立評論, **77**, 10, 719~722(平7-10)
- 3) 草野, 外: 1.8~2.0 GHz帯デジタル方式移動体通信用の高周波デバイス, 日立評論, **78**, 11, 757~762(平8-11)
- 4) 遠藤, 外: デジタルセルラ規格“GSM/EGSM”用高周波部アナログ信号処理IC, 日立評論, **79**, 11, 885~890(平9-11)

執筆者紹介



草野 忠四郎

1976年日立製作所入社, 半導体事業本部 汎用半導体事業部 所属
現在, 化合物半導体高周波デバイスの開発・設計に従事
工学博士
電子情報通信学会会員, 応用物理学会会員
E-mail: kusano@cm.musashi.hitachi.co.jp



安達 徹朗

1980年日立東部セミコンダクタ株式会社入社, 日立製作所半導体事業本部 汎用半導体事業部 所属
現在, 携帯電話用高周波パワーモジュールの開発・設計に従事



遠藤 武文

1986年日立製作所入社, 半導体事業本部 システムLSI事業部 システムLSI本部 所属
現在, GSM/DCS-1800方式携帯電話用高周波ICの開発に従事
E-mail: endouta@cm.musashi.hitachi.co.jp



須藤 茂幸

1986年日立製作所入社, マルチメディアシステム開発本部 所属
現在, 携帯電話用LSIの開発に従事
電子情報通信学会会員
E-mail: sudo@msrd.hitachi.co.jp



坂井 修一

1973年日立製作所入社, 半導体事業本部 システムLSI事業部 システムLSI本部 所属
現在, 携帯電話用半導体の技術サポートとマーケティングに従事
E-mail: sakaisyu@cm.musashi.hitachi.co.jp